

基于光纤微结构加工和敏感材料物理融合的光纤传感技术

王闵 刘复飞 周贤 戴玉堂 杨明红

Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films

Wang Min Liu Fu-Fei Zhou Xian Dai Yu-Tang Yang Ming-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 070703 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究

Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing

物理学报.2017, 66(7): 070702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070702>

单模光纤中用声波导布里渊散射同时测量温度和应变

Simultaneous measurement on strain and temperature via guided acoustic-wave Brillouin scattering in single mode fibers

物理学报.2016, 65(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.240702>

基于椭圆腔共振的石英增强光声光谱理论研究

Theoretical research on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy base on the resonance in an elliptical cavity

物理学报.2016, 65(19): 190701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.190701>

一种采用双换能器和摆式结构的宽频振动能量采集器

A broadband vibration energy harvester using double transducers and pendulum-type structures

物理学报.2016, 65(13): 130701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130701>

硅纳米线/氧化钒纳米棒复合材料的制备与气敏性能研究

Synthesis and gas-sensing properties of the silicon nanowires/vanadium oxide nanorods composite

物理学报.2016, 65(9): 090701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.090701>

专题: 光纤传感

基于光纤微结构加工和敏感材料物理融合的 光纤传感技术*

王闵¹⁾²⁾ 刘复飞²⁾ 周贤²⁾ 戴玉堂²⁾ 杨明红^{2)†}

1) (武汉纺织大学电子与电气工程学院, 武汉 430200)

2) (武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

(2016年10月31日收到; 2017年1月27日收到修改稿)

将功能敏感材料与光纤在物理层面进行有机融合, 充分发挥光纤传感器在结构集成、材料集成等方面的优势, 将有望发展新型的光纤传感器件和系统. 本文综述了飞秒激光光纤微加工技术分别在标准的单模光纤和光纤光栅上制备微结构, 再结合敏感材料制备技术, 实现在物理层面上光纤传感器材料和结构的集成和融合, 探索实现新型高性能的光纤传感新技术.

关键词: 光纤传感, 飞秒激光, 敏感薄膜

PACS: 07.07.Df, 87.85.Va, 07.79.-v

DOI: 10.7498/aps.66.070703

1 前言

传感器是获取各种信息的主要手段, 在现代测量、自动控制、安全监控、环境监测和医疗卫生等民用和军用领域都发挥着重要作用. 光纤本身可以作为敏感媒介和通信传输的介质, 光纤传感器是最有希望实现灵巧结构的传感器, 它具有体积小、易弯曲、抗电磁干扰等优点^[1-3], 具有重要的研究、开发和应用价值. 然而, 由于光纤本身对有些化学或生物的参量和物质属性不敏感, 所以无法直接利用光纤对这类物质或参量进行检测. 因此, 有必要研究敏感材料的设计和制备, 将敏感材料和光纤附着在一起, 光纤本身只起信号传输的功能, 即“传”而不感; 附着在光纤上的材料作为敏感的媒介起着敏感响应的功能, 即“感”而不传. 敏感材料和光纤附着的方式有很多, 包括机械连接、化学胶黏、热喷涂和气相沉积^[4-10]等. 其中采用气相沉积薄膜的方式在光纤的端面或者侧面制备各种敏感薄膜, 可以实现器件微型化、功能集成化等优点, 具有广泛的应用前景.

国内外对基于敏感材料的光纤传感器有一些研究, 根据原理的不同可以分为四类: 一种是在光纤光栅 (FBG) 的周面镀制敏感薄膜, 薄膜在敏感环境中导致光栅周期的变化, 从而以波长漂移的方式传感环境的变化^[11,12]; 另一类是在光纤端面制备敏感膜, 敏感膜折射率受环境的影响而改变, 从而以反射功率变化的形式感应环境的改变, 也就是所谓的基于微透镜原理的端面反射型光纤传感器^[13-15]; 还有一类是将光纤侧面微加工至纤芯, 在加工区镀制敏感薄膜, 根据消逝波耦合的原理, 敏感薄膜由于环境导致的折射率改变会影响光纤透射功率, 这也就是基于消逝波的透射型光纤传感器^[16-18]; 最后一类是基于 Fabry-Perot (F-P) 型的薄膜光纤传感器, 包括本征型和非本征型. 非本征 F-P 型光纤传感器是由两段端面镀有高反膜对准组成空气腔的传感器, 其空气腔易受环境干扰^[19]. 而本征 F-P 型光纤传感器是由全光纤构成, F-P 结构全由薄膜组成, 其中的腔层可能是无机材料, 也可能是有机材料, 其腔层折射率或者物理厚度受外界环境影响的变化导致 F-P 干涉谱的改变^[20].

* 国家自然科学基金 (批准号: 61290311, 61505150, 61575151) 和湖北省自然科学基金 (批准号: 2014CFC1138, 2015CFA016) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: minghong.yang@whut.edu.cn

从另一方面讲,敏感材料光纤传感器的研究不仅包括利用新型的薄膜材料设计薄膜光纤传感器,也包括在新型的光纤结构上利用通用的薄膜敏感材料产生新型的传感特性,从而开发新型的薄膜光纤传感器. 例如,短周期的光纤光栅由于光纤包层的足够厚度使得其布拉格波长不会因包层外环境折射率的改变而改变,但是采用侧边微加工技术,将光纤光栅一侧的包层去掉,然后在加工区镀制敏感薄膜材料,这样薄膜材料受环境影响而产生的折射率改变会导致纤芯有效折射率的变化,从而引起布拉格波长的漂移 [21-24]. 也就是说,传统的薄膜敏感材料结合新型的光纤结构设计和微加工,同样会产生新型的薄膜光纤传感器. 新型光纤结构的加工包括化学腐蚀、飞秒激光微加工和光纤侧边抛磨等,因此有必要系统地研究新型光纤结构设计加工和薄膜敏感材料结合而产生的新型薄膜光纤传感器的基础理论和关键技术.

2 光纤微结构与敏感薄膜物理融合的传感原理与技术

2.1 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉型传感器

1) 理论模型

M-Z干涉型传感器结构示意图见图1,纤芯中传播的光经过微腔被分成两路,一束光通过进入微纳光纤包层,另一束则经过微结构,两束光分别记为 I_{in1} 和 I_{in2} ,并在微结构的另一端两束光相互叠加产生干涉 [25].

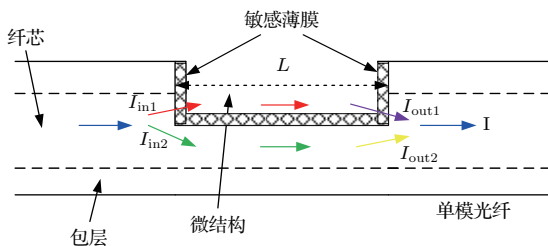


图1 M-Z干涉型光纤氢气 (H_2) 传感器的结构图

Fig. 1. Schematic structure of M-Z.

输出信号为

$$I = I_{out1} + I_{out2} + 2\sqrt{I_{out1}I_{out2}} \cos \varphi, \quad (1)$$

其中, I 表示干涉信号强度, I_{out1} 和 I_{out2} 分别为上下两条光路输出的光强, 相位差 $\varphi = 2\pi\Delta n_{eff}L/\lambda + \varphi_0$, φ_0 为干涉的初始相位, λ 为传播的光波长, L 为光纤激光微加工的微腔长度, $\Delta n_{eff} = n_{eff}^{core} - n_{eff}^{cavity}$ 为两条光路的有效折射率之差. 若敏感薄膜

为钯 (Pd) 膜, 利用其吸收氢气后体积膨胀及折射率逐渐减小的性质 [26,27], 将其与微结构相结合检测环境中氢气浓度的变化, 制作干涉型光纤氢气传感器. 当外界环境氢气浓度发生改变时, Pd膜吸收后体积会发生膨胀, 从而改变光程差 $\Delta n_{eff}L$, 使干涉条纹发生移动.

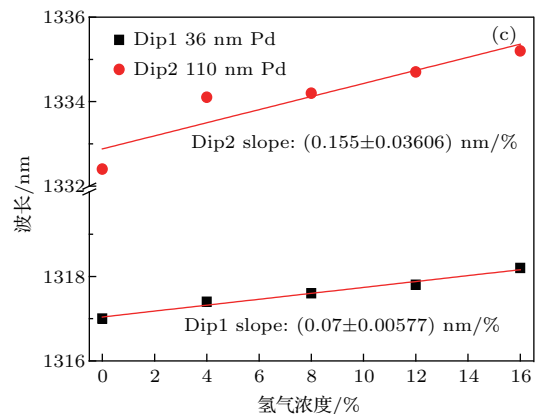
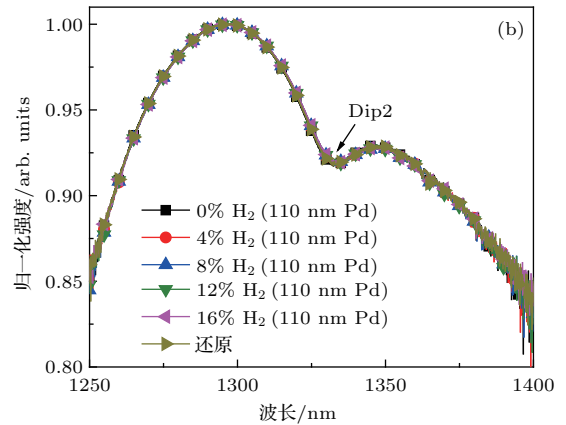
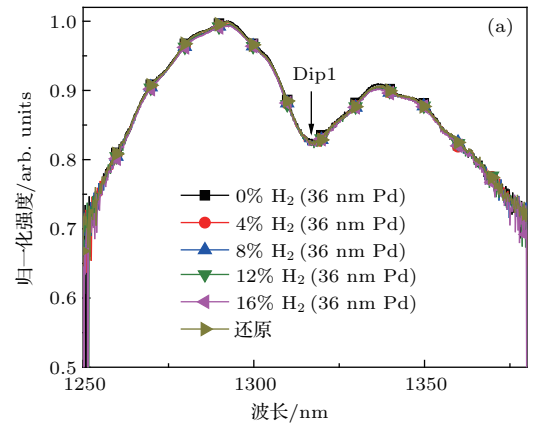


图2 (a) M-Z腔长 $40 \mu\text{m}$, Pd膜厚度 36 nm 透射谱; (b) M-Z腔长 $40 \mu\text{m}$, Pd膜厚度 110 nm 透射谱; (c) Dip1和Dip2对应氢气浓度变化的波长漂移率

Fig. 2. Normalized transmission spectra of M-Z coated with micro-cavity lengths of $40 \mu\text{m}$, (a) $d_{\text{film}} = 36 \text{ nm}$; (b) $d_{\text{film}} = 110 \text{ nm}$; (c) wavelength versus hydrogen concentration with different thickness of $d_{\text{film}} = 36 \text{ nm}$ and $d_{\text{film}} = 110 \text{ nm}$.

2) 实验制备及测试结果

实验中, 利用脉宽为180 fs, 中心波长780 nm, 脉冲频率1 kHz的飞秒激光器直写光纤微结构, 制备腔长为40 μm膜厚度分别为36 nm和110 nm的M-Z样品进行氢气实验, 其光谱图如图2所示. 从图2可以看出, 随着氢气浓度的增加, Dip1和Dip2的波长向长波长方向发生移动, 与前面的理论分析相符. Dip1和Dip2波长漂移率分别约为0.070 nm/%和0.155 nm/%, 如图2(c)所示. 由此可以看出微加工腔长为40 μm, 当镀不同膜厚度为36 nm和110 nm Pd的情况下, 110 nm Pd膜的样品变化幅度比36 nm Pd膜的变化量提高了近一倍, 其主要原因可能在于110 nm Pd薄膜比36 nm Pd薄膜的多溅射了约74 nm的Pd薄膜, 在通入氢气的过程中需要更多更高浓度的氢气才会达到饱和. 在实际测量过程中, 36 nm Pd薄膜的响应时间大概为40 s, 而110 nm Pd薄膜的响应时间90 s, 由于Pd薄膜越厚, 越需要更多高浓度氢气才能达到饱和, 因此也会使传感器的响应时间变长. 因此, 在制作传感器的过程中, 既要考虑膜越厚其波长漂移越明显, 又要考虑其对实际响应时间的影响, 综合需要选取适当的Pd薄膜厚度. 此外, 利用飞秒激光加工微腔, 腔长越短其损耗也会降低, 但是如果腔过于小则会给后续镀膜带来难度, 因此在制作传感器的过程中可以根据需要选取合适的微腔腔长.

2.2 F-P干涉型传感器

1) 理论模型

利用飞秒激光微在光纤上蚀除纤芯以及纤芯附近的部分包层形成F-P微腔, 如图3所示.

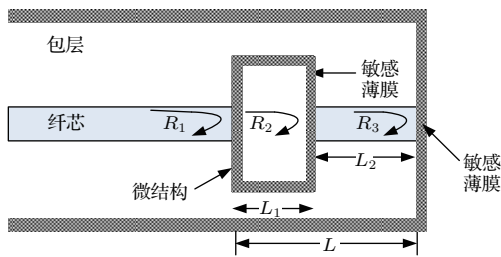


图3 F-P干涉型光纤氢气传感器的结构图
Fig. 3. Schematic structure of F-P.

通过飞秒激光微加工的微腔界面反射率较低, 因此在分析中忽略微腔中的多次反射效应. 根据干涉理论, F-P干涉型传感器的原理可表示为 [28,29]

$$I_0 = 2RI_{in} \left(1 + \cos \frac{4\pi nL}{\lambda} \right), \quad (2)$$

式中 I_0 为经多次反射相干后输出的光强, I_{in} 表示入射光强度, R 是界面反射率, λ 为传播的光波长, L 为光纤激光微加工的微腔长度, n 为F-P微腔的有效折射率. Pd薄膜吸氢后, 对Pd薄膜产生应力从而使F-P微腔产生应变, 其F-P微腔腔长变化量与氢气浓度的关系可以表示如下 [30,31]:

$$\Delta L = 0.026L \left| \frac{E_1(b^2 - a^2)(a+r)}{E_1(b^2 - a^2)(a+r) + E_2(a^2 - r^2)a} \right| x, \quad (3)$$

其中, ΔL 为光纤激光微加工的微腔长度变化量, a 是光纤的半径, b 为光纤的半径 a 加上薄膜的厚度, r 是微腔的半径, E_i ($i = 1, 2$) 分别为单模光纤和Pd薄膜的弹性模量, ($E_1 = 17 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $E_2 = 7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$), x 为氢气浓度. 由(3)式可以看出, 当氢气浓度发生改变时, Pd膜的厚度及有效折射率会发生改变.

2) 实验制备及测试结果

实验制备的F-P干涉型光纤氢气传感器样品Pd膜厚度为20 nm, 其微结构如图3所示, 其中,

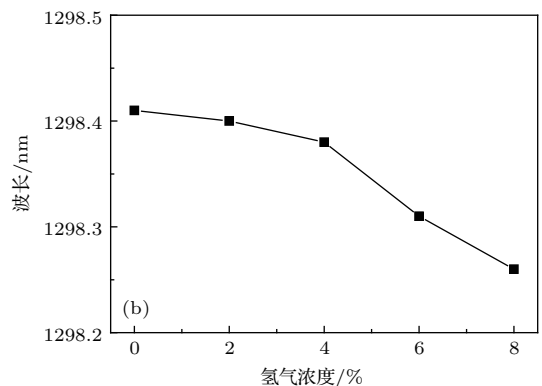
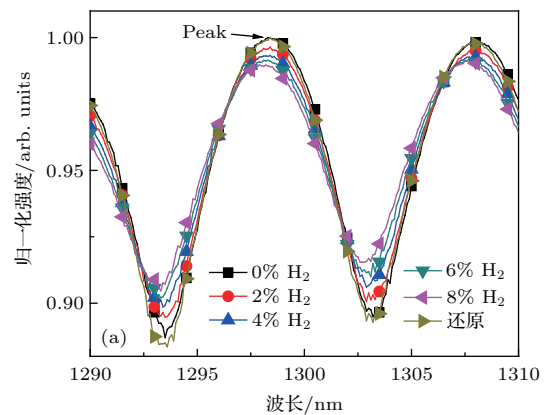


图4 (a) F-P ($L_1 = 20 \mu\text{m}$, $L_2 = 50 \mu\text{m}$, Pd膜厚度20 nm)在不同氢气浓度中的反射谱; (b) F-P在波长1298.42 nm对应不同氢气浓度的波长漂移量
Fig. 4. (a) Normalized reflection spectra of F-P with $L_1 = 20 \mu\text{m}$, $L_2 = 50 \mu\text{m}$, $d_{\text{film}} = 20 \text{ nm}$; (b) wavelength versus hydrogen concentration.

微结构腔长 L_1 为 20 μm , 微腔端面到光纤端面长度 L_2 为 50 μm . 在室温环境下, 当氢气浓度从 0 升高到 8%, 其反射谱如图 4(a) 所示. 图 4(b) 是对样品波长在 1298 nm 附近的波峰 Peak 的波长漂移曲线进行分析, 在氢气浓度分别为 2%, 4%, 6%, 8% 时, 其对应的波长漂移量分别为 10 pm, 30 pm, 100 pm 和 150 pm, 氢气灵敏度约为 $-0.0195 \text{ nm}/\%$. 从图 4(b) 可以看出, 随着氢气体积浓度的增加, Peak 向左移动, 并且光谱强度逐渐降低, 与模拟仿真分析结果相符. 随着氢气体积浓度增加, Pd 膜体积膨胀以及其拉动微腔长度变化改变其腔长, 同时, Pd 膜的折射率减小, 整个微加工腔中的有效折射率也随之减小. 因此, F-P 光程差会发生改变, 波长向短波长方向漂移, 谱线朝左边移动, 由此说明微加工腔中介质的有效折射率的改变占了主导因素.

3 光纤光栅微结构加工与敏感材料融合

3.1 微结构光纤光栅磁场传感器

3.1.1 基于均分直槽 FBG 微结构磁场传感器

首先利用飞秒激光在光纤光栅包层内加工均分直槽, 然后采用氢氟酸 (HF) 清洗加工后的微结构, 再在微结构表面镀膜, 制备出一种新型光纤磁场传感探头样品.

假设外界引入一个磁场, 磁致伸缩材料所产生的应变为 ε , 那么磁场所产生的应变应满足下列公式:

$$\varepsilon = f(H), \quad (4)$$

式中 H 为磁场强度. 同时, 当外界产生应变时, 光纤光栅中心波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon, \quad (5)$$

式中 λ_B 为中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为中心波长漂移量, P_e 为有效弹光系数. 由于磁致伸缩膜直接覆盖于光栅的包层, 因此其产生的应变将可直接传递到光纤光栅的应变上. 结合上述两式, 可得磁场强度与波长漂移量之间的关系为

$$H = f^{-1}\left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1 - P_e)}\right). \quad (6)$$

由此可知, 通过光纤光栅原始中心波长以及中心波长的变化可以测得磁场强度的大小.

将制作好的传感器样品进行编号, 编号方式为 G-P-v-n (G 代表直槽结构、P 代表激光束能量、v 代表扫描速度、n 代表直槽个数), 没加工任何微结构的样品编号为 NO.

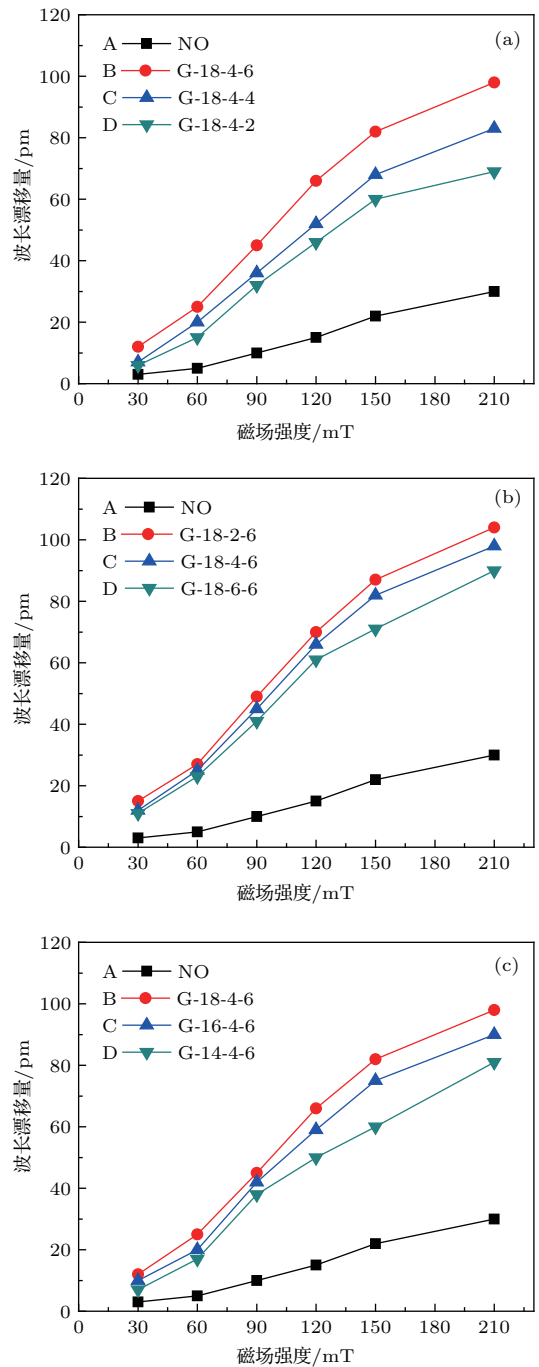


图 5 (a) 不同槽数下波长漂移与磁场强度的关系; (b) 不同扫描速度下波长漂移与磁场强度的关系; (c) 不同激光能量下波长漂移与磁场强度的关系

Fig. 5. (a) The relationship between wavelength shift and magnetic field intensity with different number of grooves; (b) the relationship between wavelength shift and magnetic field intensity at different scanning speeds; (c) the relationship between the wavelength shift and the magnetic field strength under different laser power.

图 5(a) 所示为不同槽数条件下波长漂移与磁场强度的关系, 图 5(b) 为不同扫描速度条件下探头的磁场传感增敏特性图, 图 5(c) 所示为不同激光能量条件下波长漂移与磁场强度的关系. 综合分析图 5 所示曲线, 可以看出, 直槽个数越多、扫描速度越小、激光能量越大, 相应地, 灵敏度就越高. 相比较而言, 直槽个数对传感器探头灵敏度的影响最大.

3.1.2 基于螺旋FBG微结构磁场传感器

利用飞秒激光在光纤光栅包层加工螺旋微结构, 并结合磁控溅射技术, 在微结构上镀制超磁致伸缩材料膜 Tb₂DyFe, 制作出基于螺旋微结构的新型磁场传感器探头. 实验表明能够有效地提高灵敏度, 且所加工出的螺旋结构强度高、体积小、重量轻, 操作便捷而迅速, 有着良好的应用前景.

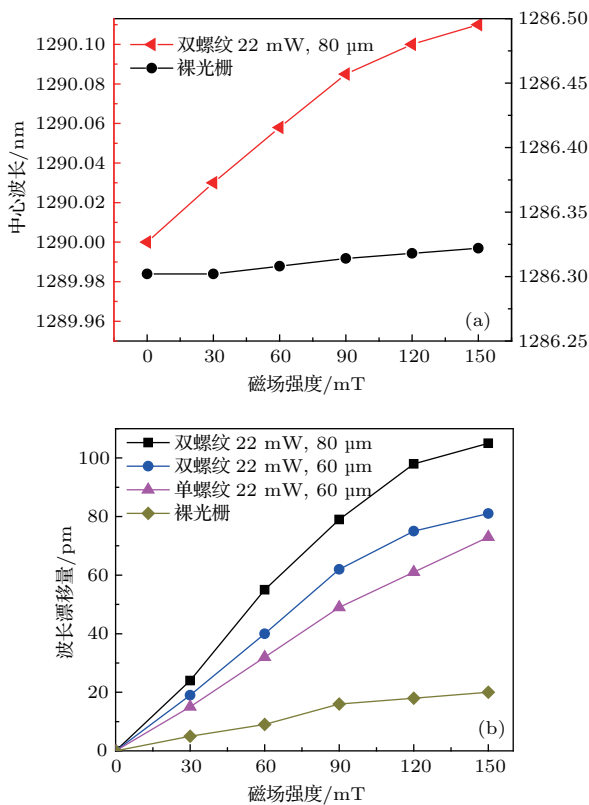


图 6 (a) FBG 磁场传感器波长漂移与磁场强度关系; (b) 不同微结构 FBG 传感器磁场响应曲线

Fig. 6. (a) The relationship between the wavelength shift and the magnetic field strength for the FBG magnetic field sensors; (b) the magnetic response curves of the FBG sensors with different microstructures.

图 6(a) 为双螺旋微结构螺距为 80 μm 的磁场传感器波长漂移对磁场的响应曲线. 由图 6(a) 可知, 随着磁场强度的增大, 探头的中心波长漂移量也随之增大. 在磁感应强度为 150 mT 时, 双螺旋传

感探头的波长漂移量可达 110 pm, 而裸光栅的漂移量仅为 20 pm, 也就是说, 双螺旋探头的灵敏度提高了 5.5 倍; 另一方面, 随着磁场强度的增大, 中心波长漂移量增加的趋势逐渐减小, 到 150 mT 时基本趋于稳定, 这是因为超磁致伸缩材料 Tb₂DyFe 的伸缩效应已经达到最大值, 所以即使磁场强度继续增加, 中心波长漂移量也不会再增大.

图 6(b) 为不同微结构 FBG 对磁场响应的曲线, 可以看出, 双螺旋 FBG 磁场传感探头的磁场灵敏度比单螺旋 FBG 磁场传感探头的灵敏度高. 这是因为双螺旋微结构有上下对称的微槽, 这样就增加了镀膜面积, 而且横截面也相对更小, 因此在同样的磁场下, 其波长漂移量更加显著. 另一方面, 在双螺旋微结构中, 螺距为 80 μm 的 FBG 中心波长漂移量比螺距为 60 μm 的中心波长漂移量大, 其灵敏度可达 1.1 pm/mT, 这说明螺旋的螺距越大, 其对磁场的灵敏度也更高. 这是因为螺距越大, 磁致伸缩所产生的磁场力沿光纤轴向的分量也更大, 因此产生的应变也相对较大, 灵敏度也就越高.

3.2 微结构FBG氢气传感器

3.2.1 基于均分直槽FBG微结构氢气传感器

应用飞秒激光在 FBG 包层上加工了均分 6 直槽和 8 直槽微结构, 随后在槽表面镀上 520 nm 的钯/银 (Pd/Ag) 复合薄膜, 其比例为 3 : 1. 镀 Pd/Ag 复合膜的 FBG 光纤氢气传感探头的重复性实验如图 7(a) 所示, 测试环境温度为 25 °C. 当氢气浓度从 0% 上升至 4% 的过程中, 中心波长有明显的上升趋势, 响应时间相比纯 Pd 膜 FBG 传感器响应的数十分钟缩短至 200 s, 原因是氢原子在加入银含量的 Pd/Ag 合金膜中的渗透速率更快. 响应时间和恢复时间定义为: 当吸氢气和解吸附氢气时, 信号变化达到 100% 所需要的时间. 响应时间相对较长的原因是氢气要渗透进较厚的 Pd/Ag 合金膜. 当氢气充入气室时, 氢气首先分离成氢原子, 然后渗透进 Pd/Ag 膜表面. 当薄膜表面附近的氢原子含量饱和时, 氢原子向更深处渗透. 然而, 在整个扩散过程中薄膜表面的氢含量保持很高的数值, 这个现象导致了长的恢复时间.

图 7(b) 给出了不同激光加工能量、不同镀膜厚度的微结构传感探头波长漂移量随氢气浓度的变化关系. 氢气浓度在 2%—4% 时, 氢气浓度和波长漂移量基本呈现线性关系. 当膜厚度为 520 nm 时, 用 75 mW 和 65 mW 激光加工传感

探头的灵敏度分别为 16.5 pm/%H 和 13.5 pm/%H; 当膜厚度为 260 nm 时, 用 75 mW 和 65 mW 激光加工的传感探头的灵敏度分别为 12.5 pm/%H 和 7.5 pm/%H. 无微结构的镀 520 nm 膜的标准 FBG 的灵敏度为 4 pm/%H. 当氢气浓度低于 1% 时, 所有样品的波长漂移量都相对较低, 这是由于低的氢压不足以迫使大量的氢原子渗透进薄膜.

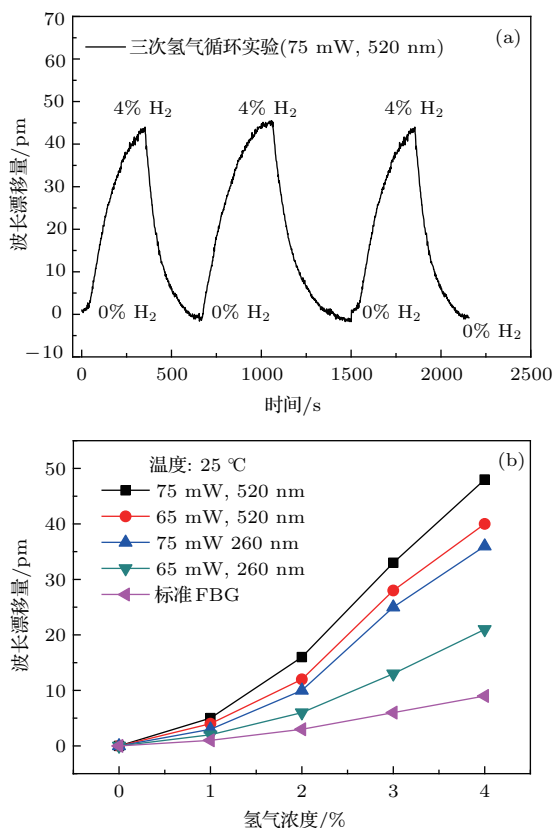


图 7 (a) 镀 Pd/Ag 复合膜 FBG 波长随氢气浓度的变化 [32]; (b) 波长漂移量随氢气浓度的变化
Fig. 7. (a) Three cycles of hydrogen response of micro-structured FBG and coated with 520 nm Pd/Ag composite film performed at 25 °C; (b) the wavelength shift of sensors fabricated with varying laser pulse power, Pd/Ag composite film thickness.

3.2.2 基于螺旋光纤光栅微结构氢气传感器

相比直槽微结构, 在光纤包层加工螺旋微结构的 FBG 光纤灵敏度更大, 并且加工时间更短. 当包层表面镀上氢敏感膜, 可以增大镀膜表面积, 从而螺旋微结构 FBG 传感器的灵敏度能够得到很大的提高.

含银量的增加可以抑制 Pd 膜吸氢后的相变, 但是同时降低了 Pd 膜吸收氢气的量. 根据文献 [33], 当 Ag 含量在 20%—25% 时, 氢在 Pd/Ag 系统中具有最快的渗透速率. 根据多次实验测试得到钯银比例为 4 : 1 时, 在室温环境下, 螺旋微结构传

感探头对氢气的响应时间最快.

图 8 (a) 表明样品 ss-1 (螺距 90 μm, 加工激光能量 35 mW) 的中心波长响应曲线, 测试环境温度室温 25 °C, 相对湿度 32%. 当氢气浓度达到 4% 时, 中心波长漂移量为 210 pm. 三次循环测试后, 样品的漂移量基本持平, 有 1—2 pm 波动.

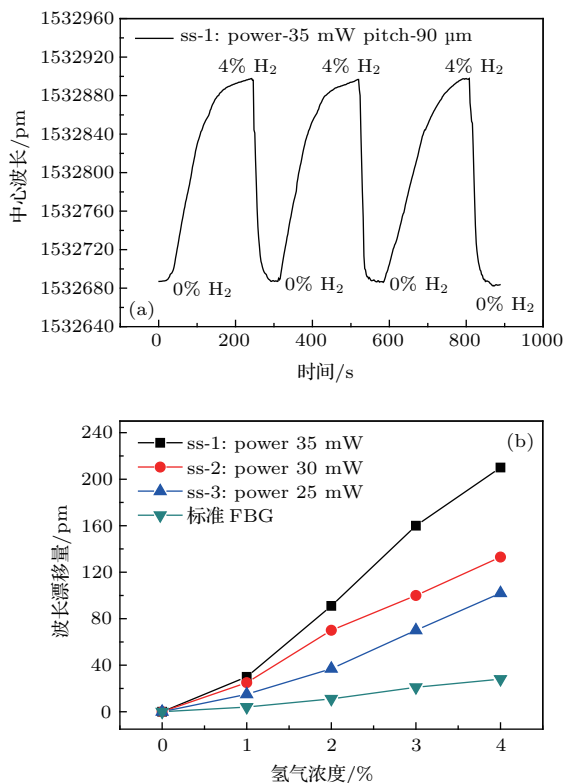


图 8 (a) 氢气浓度与中心波长关系; (b) 不同激光能量加工样品的波长漂移关系
Fig. 8. (a) Corresponding sensing responses for Pd₄/Ag₁ FBG sensor at different hydrogen concentration; (b) performance of double spiral microstructured sensors with different laser power.

图 8 (b) 所示为三个样品漂移量的比较, 说明不同激光能量加工的螺旋槽传感探头灵敏度的区别. ss-1, ss-2, ss-3 分别代表激光能量 35, 30 和 25 mW 加工的样品, 螺距都为 90 μm. 在浓度范围 1%—4% 内, 样品 ss-1, ss-2, ss-3 的灵敏度分别为 52.5, 33.3, 25.5 pm/%H, 标准 FBG 的灵敏度为 7 pm/%H. 可以看出能量最大加工的样品漂移量最大, 相比无微结构的标准 FBG 样品, ss-1 的灵敏度是它的 7.5 倍. 能量越大, 加工的螺旋槽深度越深, 光纤更易拉伸. 同时镀膜的表面积增加, 使得光纤表面沉积的薄膜更多, 吸氢后膨胀作用在光纤轴向力更大. 综合两个方面作用, 能量最大的样品中心波长漂移量最大.

4 总 结

功能敏感材料应用于光纤传感, 通常只是将敏感材料涂覆在光纤上, 利用敏感材料感知外界参量, 利用波导光纤实现传感信号的传导. 如果将光纤结构进行微结构的设计和调控, 则可以通过调整微结构实现光场传输的调控, 再结合功能敏感材料, 将可以实现结构设计和材料集成在光纤上物理融合, 将有望从更多的维度对传感特性进行设计, 一方面可以大大提升传感器的传感性能(如灵敏度), 另一方面, 将有望发展新型传感技术的物理实现, 为传感技术的前沿技术提供更多发展空间.

参考文献

- [1] Kao T W, Tayler H F 1996 *Opt. Lett.* **21** 615
- [2] Rao Y J 2006 *Opt. Fiber Technol.* **12** 227
- [3] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, Zhu T 2003 *J. Lightw. Technol.* **21** 1320
- [4] Woolley A T, Marbles R A 1995 *Anal. Chem.* **67** 3676
- [5] Qiu F, Matsumiya M, Shin W, Izu N, Murayama N 2003 *Sensors Actuat. B: Chem.* **94** 152
- [6] Matsumiya M, Shin W, Izu N, Murayama N 2003 *Sensors Actuat. B: Chem.* **93** 309
- [7] Ryzhikov A S, Shatokhin A N, Putilin F N, Rumyantseva M N, Gaskov A M, Labeau M 2005 *Sensors Actuat. B: Chem.* **107** 387
- [8] Shukla S, Seal S, Ludwig L, Parish C 2004 *Sensors Actuat. B: Chem.* **97** 256
- [9] Tan O K, Zhu W, Tse M S, Yao X 1999 *Mater. Sci. Eng. B* **58** 221
- [10] Gong J W, Chen Q F, Fei W F, Seal S 2004 *Sensors Actuat. B: Chem.* **102** 117
- [11] Yang M H, Dai J X 2012 *Photon. Sensors* **2** 14
- [12] Yang M H, Dai J X, Zhou C M, Jiang D S 2009 *Opt. Express* **17** 20777
- [13] Butler M A 1994 *J. Electrochem. Soc.* **138** L46
- [14] Butler M A 1994 *Sensors Actuat. B: Chem.* **22** 142
- [15] Bevenot X, Trouillet A, Veillas C, Gagnaire H, Clément M 2000 *Sensors Actuat. B: Chem.* **67** 57
- [16] Dikovska A O, Atanasov P A, Stoyanchov T R, Andreev A T, Karakoleva E I, Zafirova B S 2007 *Appl. Opt.* **46** 2481
- [17] Kim K T, Song H S, Mah J P, Hong K B, Im K, Baik S J, Yoon Y I 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 1767
- [18] Dikovska A O, Atanasov P A, Andreev A T, Zafirova B S, Karakoleva E I, Stoyanchov T R 2007 *Appl. Surf. Sci.* **254** 1087
- [19] Yang Z, Zhang M, Liao Y B, Tian Q, Li Q S, Zhang Y, Zhuang Z 2010 *Appl. Opt.* **49** 2736
- [20] Liu N, Hui J, Sun C Q, Dong J H, Zhang L Z, Xiao H 2006 *Sensors* **6** 835
- [21] Yang M H, Dai J X, Li X B, Wang J J 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 033102
- [22] Dai J X, Yang M H, Chen Y, Cao K, Liao H S, Zhang P C 2011 *Opt. Express* **19** 6141
- [23] Dikovska A O, Atanasova G B, Nedyalkov N N, Stefanov P K, Atanasov P A, Karakoleva E I, Andreev A T 2010 *Sensors Actuat. B: Chem.* **146** 331
- [24] Poole Z L, Ohodnicki P, Chen R, Lin Y, Chen K P 2014 *Opt. Express* **22** 2665
- [25] Wang M, Yang M, Cheng J, Dai J X, Yang M H, Wang D N 2012 *Opt. Lett.* **37** 1940
- [26] Butler M A 1991 *J. Electrochem. Soc.* **138** L46
- [27] Butler M A 1994 *Sensors Actuat. B: Chem.* **22** 142
- [28] Park K S, Kim Y H, Eom J B 2011 *Opt. Express* **19** 18190
- [29] Wang M, Yang M H, Cheng J, Zhang G L, Liao C R, Wang D N 2013 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **25** 713
- [30] Zhang Y, Li Q S, Zhuang Z. 2011 *Proceedings of 21st International Conference Optics Fiber Sensors Ottawa, Canada, May 15–19, 2011* p775369
- [31] Butler M A, Ginley D S 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 3706
- [32] Karanja J M, Dai Y T, Zhou X, Liu B, Yang M H 2015 *Opt. Express* **23** 31034
- [33] Zhang W G, Liu Z L, Yin L M 2011 *Acta Opt. Sin.* **7** 86 (in Chinese) [张伟刚, 刘卓琳, 殷丽梅 2011 光学学报 **7** 86]

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films*

Wang Min¹⁾²⁾ Liu Fu-Fei²⁾ Zhou Xian²⁾ Dai Yu-Tang²⁾ Yang Ming-Hong^{2)†}

1) (School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

2) (National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(Received 31 October 2016; revised manuscript received 27 January 2017)

Abstract

Integration of novel functional material with fiber optic components is one of the new trends in the field of novel sensing technologies. The combination of fiber optics with functional materials offers great potential for realizing the novel sensors. Typically in optical fibre sensing technology, fibre itself acts as sensing element and also transmitting element, such as fiber Bragg grating (FBG), Brillouin or Raman optical time domain reflectometer. However such sensing components can only detect limited physical parameters such as temperature or strain based on the principle of characteristic wavelength drifts. While the idea of optical fiber sensing technology with functional materials is quite different from that of the traditional technology, functional materials can be employed as sensing components, therefore many parameters, including chemical or biological parameters, can be detected, depending on the designs of different sensing films. When compared with the common fiber sensing technologies such as FBG and optical time domain reflectometer, fiber optic sensors based on functional materials show advantages in the diversity of measurement parameters. However, functional materials can be realized by many techniques including e-beam evaporation, magnetron sputtering, spin-coating, electro-chemical plating, etc. The mechanical stability of tiny optical fibers is still problematic, which could be a challenge to industrial applications.

In this work, a femtosecond laser fabricated fiber inline micro Mach-Zehnder interferometer with deposited palladium film for hydrogen sensing is presented. Simulation results show that the transmission spectrum of the interferometer is critically dependent on the microcavity length and the refractive index of Pd film, and a short microcavity length corresponds to a high sensitivity. The experimental results obtained in a wavelength region of 1200–1400 nm, and in a hydrogen concentration range of 0–16%, accord well with those of the simulations. The developed system has high potential in hydrogen sensing with high sensitivity. Three-dimensional multitrench microstructures, femtosecond laser ablated in fiber Bragg grating cladding, TbDyFe sputtering are proposed and demonstrated for magnetic field sensing probe. Parameters such as the number of straight microtrenches, translation speed (feed rate), and laser pulse power of laser beam have been systematically varied and optimized. A 5- μm -thick giant Terfenol-D magnetostrictive film is sputtered onto FBG microtrenches, and acts as a magnetic sensing transducer. Eight microtrench samples produce the highest central wavelength shift of 120 pm, nearly fivefold more sensitive than nonmicrostructured standard FBG. An increase in laser pulse power to 20 mW generates a magnetic sensitivity of 0.58 pm/mT. Interestingly, reduction in translational speed contributes dramatically to the rise in the magnetic sensitivity of the sample. These sensor samples show magnetic response reversibility and have great potential in the magnetic field sensing domain. Furthermore hydrogen

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61290311, 61505150, 61575151), and Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant Nos. 2014CFC1138, 2015CFA016).

† Corresponding author. E-mail: minghong.yang@whut.edu.cn

sensors based on fiber Bragg gratings micro-machined by femtosecond laser to form microgrooves and sputtered with Pd/Ag composite film are proposed and demonstrated. The atomic ratio of the two metals is controlled at Pd : Ag = 3 : 1. At room temperature, the hydrogen sensitivity of the sensor probe micro-machined by 75 mW laser power and sputtered with 520 nm of Pd/Ag film is 16.5 pm/%H. Comparably, the standard FBG hydrogen sensitivity becomes 2.5 pm/%H for the same 4% hydrogen concentration. At an ambient temperature of 35 °C, the processed sensor head has a dramatic rise in hydrogen sensitivity. Besides, the sensor shows good response and repeatability during hydrogen concentration test.

Keywords: optical fiber sensors, femtosecond laser micromachining, sensitive film

PACS: 07.07.Df, 87.85.Va, 07.79.-v

DOI: [10.7498/aps.66.070703](https://doi.org/10.7498/aps.66.070703)